

# 南海北部夏季海表二氧化碳分压及其海气通量的遥感算法初探<sup>\*</sup>

朱 钰 商少凌<sup>\*\*</sup> 翟惟东 戴民汉

厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361005

**摘要** 基于 2004 年夏季南海北部现场调查数据初步建立单一温度参数与温度和叶绿素 a 双参数估计海表二氧化碳分压( $p_{\text{CO}_2}$ )的遥感经验算法. 采用一组独立数据(2000 年夏季)检验的结果, 单一参数和双参数算法反演值与实测值之间的均方根误差(RMS)分别为  $22.1 \mu\text{atm}$  ( $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ )和  $6.3 \mu\text{atm}$ , 说明南海北部夏季叶绿素 a 对  $p_{\text{CO}_2}$  的时空变动仍然有不可忽略的影响, 因此, 采用双参数算法是必要的. 进一步结合卫星风场数据计算夏季南海北部海气  $\text{CO}_2$  通量, 2000 年夏季  $\text{CO}_2$  通量为  $7.65 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 与基于实测数据估算的通量基本相符. 多年平均的遥感海气  $\text{CO}_2$  通量的空间差异显著, 表明基于现场数据的简单外推可能导致较大的不确定性, 现场与遥感手段的结合是提高大尺度碳通量观测可靠性的理想手段.

**关键词** 海表二氧化碳分压 遥感 南海北部 二氧化碳通量

工业革命以来, 由于化石燃料使用等人为活动, 导致大气二氧化碳( $\text{CO}_2$ )的平均浓度从过去 420 ka 中的  $180\text{--}300 \mu\text{L/L}^{[1]}$  上升到现在的  $380 \mu\text{L/L}^{[2]}$ . 占地球表面积 71% 的海洋作为大气  $\text{CO}_2$  重要的汇区<sup>[3]</sup>, 对全球气候的变化具有关键性的调控作用, 而海-气界面  $\text{CO}_2$  通量是评估海洋在全球变化中作用的前提和基础<sup>[4]</sup>. 获得海-气界面  $\text{CO}_2$  通量时空分布最直接的方法是利用船舶定时测量各站位或走航观测海水表层  $\text{CO}_2$  分压(海表  $p_{\text{CO}_2}$ ), 但这种方法只能得到测量点或断面的海表  $p_{\text{CO}_2}$ , 难以同步获得大面积的海表  $p_{\text{CO}_2}$ . 海表  $p_{\text{CO}_2}$  受海表温度控制, 当海表温度增加  $1^\circ\text{C}$ , 海表  $p_{\text{CO}_2}$  将增加 4%<sup>[5]</sup>, 同时海洋上层的初级生产过程也是影响海表  $p_{\text{CO}_2}$  的一个因素<sup>[6, 7]</sup>, 因此海表  $p_{\text{CO}_2}$  与海表温度(SST)、叶绿素等可实现卫星遥测的参数之间存在密切的相关关系. 故而通过建立经验函数, 间接遥测  $p_{\text{CO}_2}$  的方法得以问世. 这一方法随着遥感技术尤其是水色遥感的飞速发

展, 愈来愈得到关注, 人们针对空间尺度不等的不同区域推导出各种算法. 在北太平洋海区, Stephens 等应用遥感 SST 数据对  $p_{\text{CO}_2}$  分布情况进行探索性研究<sup>[8]</sup>; 随后 Ono 等在 Stephens 的研究基础上加入叶绿素参数改进了  $p_{\text{CO}_2}$  遥感算法<sup>[9]</sup>; 2006 年 Sarma 等研发了含有 SST、叶绿素、盐度 3 个参数的  $p_{\text{CO}_2}$  遥感算法, 并利用实测的盐度数据结合遥感 SST、叶绿素数据计算该海区  $p_{\text{CO}_2}$  分布情况<sup>[9]</sup>. Lohrenz 和 Cai 根据河口海区 CDOM 与盐度有着良好的相关性的特性, 将 CDOM 作为一个参数加入了  $p_{\text{CO}_2}$  遥感算法, 为近岸/河口海区  $p_{\text{CO}_2}$  遥感算法的研究提供了很好的思路<sup>[7]</sup>.

南海是全球主要的边缘海之一, 同时也是中国邻近海域碳收支的关键区域之一<sup>[10]</sup>. 因此研究该海域二氧化碳的源汇问题以及碳循环对于气候变动的响应具有非常重要的意义, 针对该区域发展碳遥感手段, 显然是十分必要的. 本文尝试利用南海北部

2007-12-17 收稿, 2008-02-15 收修改稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 40521003), 国家“八六三”计划(批准号: 2006AA09A302, 2007AA09Z127)和厦门大学新世纪人才计划联合资助项目

<sup>\*\*</sup> 通信作者: E-mail: sishang@xmu.edu.cn

获得的实测数据建立单一温度参数与温度/叶绿素双参数的  $p\omega_2$  经验函数, 进行不同函数模型的比较、分析与检验, 并进一步估算  $\text{CO}_2$  海气通量.

## 1 数据来源

### 1.1 现场数据

采用 2004 年 7 月 11 日—22 日南海走航  $p\text{CO}_2$  实测数据, 其中包括两个连续观测站数据(图 1(a))建立经验函数, 2000 年 7 月 19 日—21 日(图 1(b))用于遥感  $p\text{CO}_2$  的检验.  $p\omega_2$  数据都是在正常巡航状态(船速  $15\text{--}20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ )下用连续流动式水-气平衡法获得的, 表层温度、叶绿素由固定在甲板上的 SEACAT 温盐测定系统附置一个叶绿素 a 荧光计走航连续测定<sup>[11]</sup>.

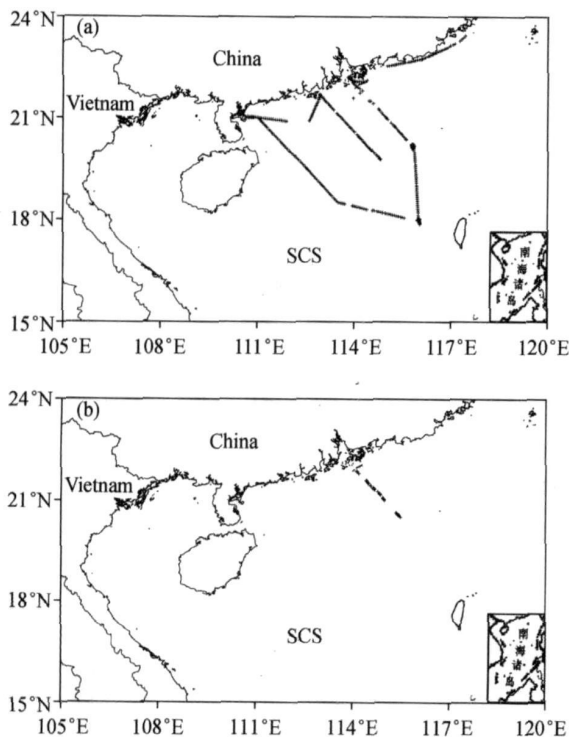


图 1 南海北部走航站位图

(a) 2004 年 7 月 11—22 日航次站位图;

(b) 2000 年 7 月 19—21 日航次站位图

### 1.2 遥感数据

AVHRR SST (Advanced Very High Resolution Sea Surface Temperature) 月平均数据取自

NASA JPL (Jet Propulsion Laboratory) (<http://podaac.jpl.nasa.gov>) 数据中心, 数据空间分辨率  $4\text{ km}$ ; SeaWiFS 叶绿素 (Chl) 月平均数据源自 NASA GSFC (Goddard Space Flight Center) (<http://oceans.gsfc.nasa.gov>) 数据中心, 空间分辨率  $9\text{ km}$ ; QuikSCAT 数据取自 NASA JPL 数据中心逐日海面 ( $10\text{ m}$  高) 风矢量数据, 每日数据包括升轨 (ascending pass) 和降轨 (descending pass) 两轨数据, 取两轨数据的平均值用于计算, 数据空间分辨率  $0.25^\circ$ . 下载 3 个参数共同覆盖年份的数据 (2000—2005 年), 针对南海北部海区 ( $15^\circ\text{--}24^\circ\text{N}$ ,  $105^\circ\text{--}120^\circ\text{E}$ ) 切割之后计算得到相应年份 6—8 月 SST、Chl、风速的月平均值.

## 2 南海北部夏季 $p\omega_2$ 算法

在建立经验函数之前, 我们首先需要进行现场数据的筛选. 2004 年航次, 获得走航  $p\omega_2$  及匹配参数 9476 组. 考虑到沿岸水体影响因素复杂, 即使直接遥测的参数如 Chl 也难以获得可信的结果, 作为一项初步的工作, 我们只针对现场观测覆盖的南海陆架-东北部海盆进行经验参数的拟合. 7 月份南海海表盐度为  $33.5\text{--}34.0$ <sup>[12]</sup>, 据此, 以盐度 33.5 为阈值, 盐度低于该值标记为近岸及外来低盐水团予以剔除; 同时在南海陆架海区 Chl 通常小于  $1\text{ mg}/\text{m}^3$ , 高于此值者予以剔除. 由此取得 6871 组数据. 需要指出的是, 这些数据包含了在两个连续观测站分别持续观测 2 d 的数据, 数据量为 3043, 为总数据量的 44%, 占较大权重. 经验参数的统计拟合采用 SigmaPlot 软件实现.

### 2.1 单参数 (SST) 算法

通常在寡营养远岸水域, SST 是  $p\omega_2$  的最主要控制因子<sup>[11]</sup>, 这也是传统单参数 (SST)  $p\omega_2$  遥感算法的理论基础. 南海北部是全球海洋初级生产力最低的区域之一<sup>[11]</sup>,  $p\omega_2$  与 SST 之间同样呈现较为显著的正相关关系(图 2a). 对其进行统计拟合, 得到以下函数:

$$p\omega_2 = 6.34T^2 - 366.65T + 5678.53 \quad (n = 6871, R^2 = 0.66) \quad (1)$$

式中  $T$  即为 SST ( $^\circ\text{C}$ ).

$$94.41Chl + 5715.94 \quad (3)$$

$$(n = 6871, R^2 = 0.68)$$

### 3 遥感 $p_{CO_2}$ 结果检验

分别应用单参数和双参数算法, 计算 2000 年 7 月南海北部遥感  $p_{CO_2}$ . 为消除近岸径流影响以及遥感近岸叶绿素数据失真、海底反射、岛屿效应等问题, 以水深 30 m 为阈值筛选遥感数据. 将计算结果与当年 7 月现场实测数据 ( $n=221$ ) 比较 (图 3). 很显然, 双参数算法的反演结果, 与实测数据的接近程度, 远大于单参数算法. 从精度统计来看, 双参数算法  $RMS$  为  $6.3 \mu atm$  ( $1 atm = 0.101325 MPa$ ), 而单参数算法  $RMS$  高达  $22.1 \mu atm$ . 可见, 生物活动对南海北部  $p_{CO_2}$  时空变化的影响仍是不可忽略的, 未来选择双参数算法在不断充实的现场实测数据库的基础上加以优化将是必要的. 类似的情况是,

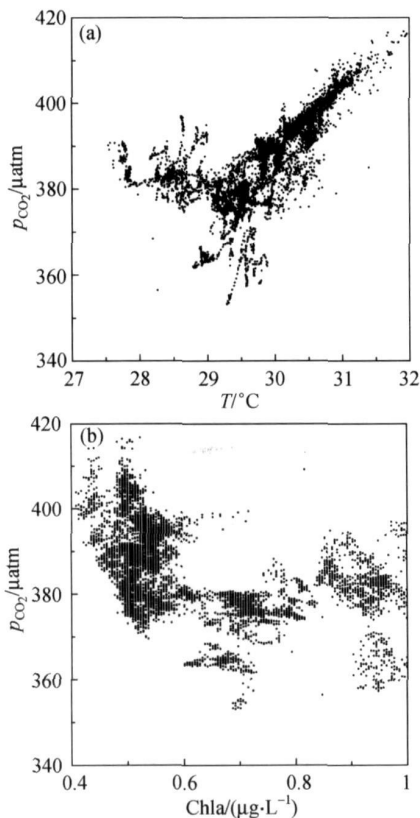


图 2 2004 年 7 月南海北部  $p_{CO_2}$  与 SST

Chl a 相关关系图

(a)  $p_{CO_2}$  与 SST 相关关系; (b)  $p_{CO_2}$  与 Chl a 相关关系

### 2.2 双参数 (SST 和 Chl) 算法

由图 2(b) 可见, 南海北部夏季  $p_{CO_2}$  大致呈现随 Chl 的增大而下降的趋势, 意味着 Chl 参数对  $p_{CO_2}$  变化有一定影响, 当然这种影响可能由于涉及浮游植物的昼夜变化而显得复杂. Ono 等发展的双参数  $p_{CO_2}$  遥感算法<sup>[6]</sup> 在北太平洋海区具有良好的精度, 故本研究考虑引用该算法, 在南海进行区域性调试. 其  $p_{CO_2}$  函数形式如下:

$$p_{CO_2} = AT + BT^2 + C \cdot Chl + D \cdot Chl^2 + E \quad (2)$$

其中 A—E 是经验系数. 通过对实测  $p_{CO_2}$  与 SST, Chl 进行拟合获得以下南海北部区域函数:

$$p_{CO_2} = 6.31T^2 + 61.9Chl^2 - 365.85T -$$

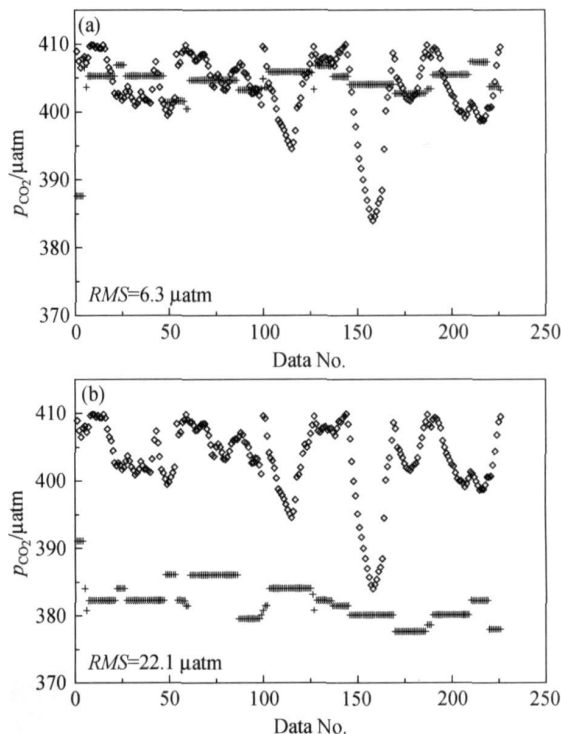


图 3 遥感  $p_{CO_2}$  计算结果与 2000 年 7 月航次  
实测  $p_{CO_2}$  比对

(a) 双参数算法  $p_{CO_2}$  计算结果 (十字标记) 与实测  $p_{CO_2}$  (菱形标记) 比对; (b) 单参数算法  $p_{CO_2}$  计算结果 (十字标记) 与实测  $p_{CO_2}$  (菱形标记) 比对

Stephens 等在北太平洋采用单参数算法, 在亚热带海区的计算结果与实测值较吻合,  $RMS = 17 \mu\text{atm}$ , 但在太平洋西北海域的误差较大,  $RMS$  为  $40 \mu\text{atm}^{[8]}$ ; Ono 等随后发展的双参数算法, 反演精度得到提高, 在亚热带海区 ( $20^\circ\text{N} - 43^\circ\text{N}$ ) 和亚北极区海区 ( $45^\circ\text{N}$  以北) 遥感计算结果与实测值的  $RMS$  分别为  $14 \mu\text{atm}$  和  $17 \mu\text{atm}^{[6]}$ .

此外, 时间尺度的不同, 使得遥感与实测数据之间, 不可能呈现一一相对的吻合. 本文采用的遥感数据为月平均尺度, 而实测值的时间分辨率为分钟, 相对剧烈的  $p\omega_2$  短时间尺度变化 (如周日变化) 完全不可能在遥感数据上体现. 然而作为初步检验, 尤其是从对比不同算法的角度出发, 这是允许的. 在实测数据进一步积累的条件下, 可考虑在某一海区做多次观测取月平均数据, 使实测数据与现场数据的时间尺度尽可能匹配<sup>[9]</sup>, 开展更为合理的检验.

#### 4 南海北部夏季遥感二氧化碳海气通量

$p\omega_2$  研究大气  $\text{CO}_2$  的源汇过程最直接的方法是测定界面通量, 通过测定海-气界面附近的  $\text{CO}_2$  分压差, 根据液膜扩散模式和 Fick 定律, 估算海区的  $\text{CO}_2$  海-气通量. 通量计算公式为:  $F = kK_H(p\omega_{\text{表层海水}} - p\omega_{\text{海面大气}})^{[13]}$ , 式中  $F$  是  $\text{CO}_2$  在海-气界面的净通量,  $k$  是海气交换系数, 又称为“活塞系数”, 经常表述为风速的函数. 这里我们采用 Wanninkhof<sup>[14]</sup>  $k = fu_{10}^2 (Sc/660)^{-0.5}$  公式计算  $k$  值. 式中  $Sc$  是  $\text{CO}_2$  在海水 ( $S = 35$ ) 中的 Schmidt 数<sup>[14]</sup>, 660 是  $\text{CO}_2$  在  $20^\circ\text{C}$  海水中的 Schmidt,  $u_{10}$  是海平面以上 10 m 高度的风速,  $f$  是一个比例系数, 对于采用长期平均风的计算是 0.39, 对于采用瞬时风计算则为 0.31.  $K_H$  是  $\text{CO}_2$  在海水中的溶解度<sup>[15]</sup>. 空气二氧化碳分压由公式  $p_{\text{CO}_2}^{\text{空气}} = x_{\text{CO}_2}^{\text{空气}}(p_b - p_{\text{H}_2\text{O}})$  计算得出, 其中  $x_{\text{CO}_2}^{\text{空气}}$  是干空气中二氧化碳摩尔比值,  $p_b$  为大气压强, 近似认为等于 1 atm,  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  为海气界面的水汽压强, 由 AVHRR 卫星数据计算得出<sup>[16]</sup>.  $x_{\text{CO}_2}^{\text{空气}}$  数据来源为 NOAA/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory (CMDL) 在 Mariana Islands ( $13^\circ 6' \text{N}$ ,  $144^\circ 7' \text{E}$ ) 的观测数据, 与以往现场实测数据非常接近<sup>[17]</sup>, 因此可以将该数据

近似认为是整个中国南海北部低空干空气摩尔比值. 由此, 我们采用双参数算法遥感  $p\omega_2$  数据计算 2000 年 7 月南海北部  $\text{CO}_2$  海气通量, 结果为  $7.65 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 基本接近由实测  $p\omega_2$  计算的通量值 ( $7.50 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>.

我们进一步计算了南海北部夏季多年平均 (2000—2005 年)  $\text{CO}_2$  通量 (图 4), 同样以 30 m 水深为阈值将沿岸、岛屿数据剔除. 由计算结果看来, 该参量的空间差异是不可忽略的, 中国、越南外海以及南海北部湾区域的  $\text{CO}_2$  通量与南海东南部海区  $\text{CO}_2$  通量相对较小, 约  $3.5 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  左右, 南海东北部较高 ( $7 - 9 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 同时 QuikSCAT 卫星风场数据也表明南海东北部风速普遍大于沿岸海域及北部湾海域. 这就导致了南海  $\text{CO}_2$  通量分布呈现东部高于西部、海盆中央高于陆架区的布局, 因而根据零星的实测断面或站点数据外推至整个南海北部来估算海气通量, 其不确定性是很高的. 需要指出的是, 以上结果, 仅只依据一个航次得到的经验算法获得, 并且只得到另一个独立航次的检验, 尚不足以获得确定的南海北部夏季  $\text{CO}_2$  通量图像, 仅供未来研究工作参考.

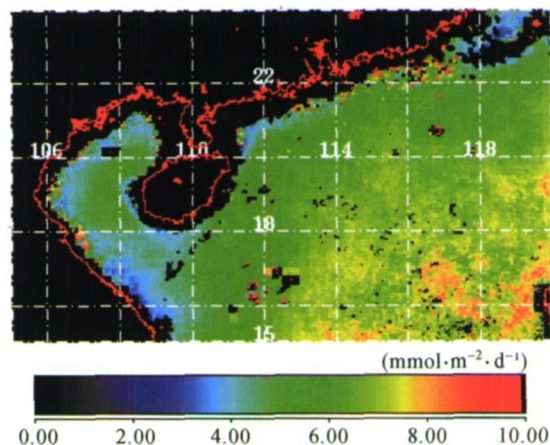


图 4 根据 2000—2005 年南海夏季遥感 SST 和叶绿素估算的南海北部夏季  $\text{CO}_2$  海-气通量初步结果

#### 5 存在问题及展望

本研究应用卫星遥感数据, 采用双参数算法所计算出的南海北部海表二氧化碳分压与往年实测数据比对有着较好的精度, 因此, 遥感技术应用于南海  $\text{CO}_2$  海-气通量观测是可行的. 由于卫星探测器

具有观测范围广、重复周期短的特点,在能够保证精度的前提下,海气  $\text{CO}_2$  通量遥感技术无疑能够降低常规断面调查研究的成本,具有很大的应用价值。需要说明的是,本研究仅对夏季南海北部特定的时空域开展初步的试验,显然需要积累更多的现场数据拓展时空域调试算法并加以验证。

## 参 考 文 献

- Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399: 429—436
- Monitoring CC. Diagnostic Laboratory, 2000—2001 Summary Report. Boulder, Colorado USA, NOAA/CMDL, 2002, 26: 28—50
- Falkowski P, Scholes RJ, Boyle E, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 2000, 290: 291—296
- 李 宁, 李学刚, 宋金明, 等. 海洋碳循环研究的关键生物地球化学过程. *海洋环境科学*, 2005, 2: 75—80
- Takahashi T, Olafsson J, Goddard JG. Seasonal variation of  $\text{CO}_2$  and nutrients in the high-latitude surface: A comparative study. *Global Biogeochem Cycles*, 1993, 7: 843—878
- Ono T, Saino T, Kunita N, et al. Basin-scale extrapolation of shipboard  $p_{\text{CO}_2}$  data by using satellite SST and Chl a. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25: 3803—3815
- Lohrenz SE, Cai WJ. Satellite ocean color assessment of air-sea fluxes of  $\text{CO}_2$  in a river-dominated coastal margin. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 1601-1—1601-4
- Stephens MP, Samuels G, Olson DB, et al. Sea-air flux of  $\text{CO}_2$  in the North Pacific using shipboard and satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 13571—13583
- Sama V, Saino T, Sasaoka K, et al. Basin-scale  $p_{\text{CO}_2}$  distribution using satellite sea surface temperature, Chl a, and climatological salinity in the North Pacific in spring and summer. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20, doi: 10. 1029/2005GB002594
- 戴民汉, 翟惟东, 鲁中明, 等. 中国区域碳循环研究进展与展望. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 120—130
- 翟惟东. 南海北部与珠江河口水域  $\text{CO}_2$  通量及其调控因子. 厦门大学博士学位论文, 厦门, 2003
- 徐锡祯. 南海海区综合调查研究报告(一). 北京: 海洋出版社, 1982, 119—128
- Liss PS. Process of gas exchange across an air-water interface. *Deep-Sea Research*, 1973, 20: 2003—2023
- Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 7373—7382
- Weiss RF. Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 1974, 2: 213—215
- Zeebe RE, Wolf-Gladrow D.  $\text{CO}_2$  in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes. Amsterdam: Elsevier, 2001
- Zhai W, Dai M, Cai WJ, et al. The partial pressure of carbon dioxide and air-sea fluxes in the northern South China Sea in spring, summer and autumn. *Marine Chemistry*, 2005, 96: 87—97